23361

Etude No. 134
IGM 84-079-134
CNRC 23361

Rapport d'avancement pour la période juillet 83 - juin 84

FATIGUE OLIGOCYCLIQUE À HAUTE TEMPÉRATURE DE L'INCONEL 625

par H.L. Nguyen

INTRODUCTION

Les résultats expérimentaux en fatigue oligocyclique de l'Inconel 625 à 815°C ont été rapportés dans le rapport d'avancement pour la période janvier-juin 1983. A cause du problème de flambage de l'échantillon au niveau élevé de déformation imposée, la longueur de jauge de l'échantillon a été réduite à 0.58". Pratt & Whitney nous a fourni de nouveaux échantillons possédant une telle géométrie. Les éprouvettes de la nouvelle série ont été testées durant la période juillet 83 - juin 84 en fatigue continue et en cyclage avec temps de maintien aux deux températures de 650°C et 815°C. Les résultats obtenus ont mis en évidence une nette influence de la température d'essai et des temps de maintien sur le comportement cyclique de l'Inconel 625. Les propriétés caractéristiques du matériau en fatigue oligocyclique ont été établis.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Les résultats d'essais générés durant la dernière période seront présentés en deux parties: fatigue continue (sans temps de maintien) et cyclage avec temps de maintien. Les données expérimentales sont résumées dans les tableaux 1 et 2. Les valeurs de déformation et de contrainte désignent les caractéristiques du matériau correspondant à la demi-durée de vie.

I. Fatigue continue

I.1 Courbes de base

La figure 1 illustre la relation entre l'endurance et l'amplitude de déformation totale imposée pour l'Inconel 625 à 650°C et 815°C. L'influence de la température sur l'endurance est apparente: pour la gamme de déformation

totale imposée $\Delta\varepsilon_t$ de 0.6 à 1.2%, l'augmentation de la température de 650 à 815°C cause une réduction de moitié de la durée de vie à un niveau de déformation élevé (e.g. $\Delta\varepsilon_t$ = 1.2%) et d'un facteur de 3 à un niveau de déformation faible (e.g. $\Delta\varepsilon_t$ = 0.6%).

Récemment, Purohit et co-chercheurs de l'"Argonne National Laboratory" [1] ont rendu publiques les courbes de fatigue (sans temps de maintien) du même matériau aux différentes températures de 650 à 1100°C et aux différentes vitesses de déformation de 0.0053 à 0.34 s^{-1}. Le type d'échantillon utilisé dans leur étude est similaire à celui employé pour le présent programme expérimental. La méthode de chauffage (par induction) est toutefois différente de celle utilisée à l'IGM (four à résistance). Ces résultats publiés sont reproduits à la figure 2 sur laquelle sont ajoutés les points expérimentaux obtenus dans le cadre de la présente étude. En tenant compte de la dispersion des résultats inhérente au phénomène de la fatigue, cette comparaison montre que nos résultats sont très cohérents avec ceux publiés par ANL, et ce malgré la différence des méthodes de chauffage (il est à noter que dans la présente étude, nous nous concentrons particulièrement sur l'effet des temps de maintien sur le comportement cyclique du matériau à haute température).

I.2 Variation de la contrainte

L'amplitude de déformation étant maintenue constante durant l'essai, la contrainte nécessaire pour maintenir cette déformation constante varie durant le cyclage. Cette variation de la contrainte en fonction du nombre de cycles appliqués caractérise le comportement cyclique du matériau, i.e. adoucissement ou consolidation cyclique. Les résultats ont montré que le comportement cyclique de l'Inconel 625 est dépendant de la température d'essai: à 650°C la consolidation cyclique est observée et ce comportement est plus prononcé au fur et à mesure que le niveau de déformation est augmenté (fig. 3a), tandis qu'à 815°C, le matériau se durcit légèrement pendant les quelques premiers cycles pour s'adoucir par la suite jusqu'à l'initiation des fissures (fig. 3b). On peut noter cependant que, indépendamment de la température, à faible niveau de déformation imposée, la contrainte se stabilise dès les premiers cycles et reste constante tout au long de l'essai. En général, en cyclage continu une très faible contrainte moyenne en compression a été observée.

Aux figures 3a et 3b, on peut noter une chute des courbes de variation de contrainte en fonction du nombre de cycles appliqués correspondant à la propagation rapide des fissures conduisant à la rupture de l'éprouvette. Dans la présente étude, le nombre de cycles à la rupture est défini en correspondance avec une chute de 50% de la contrainte stabilisée.

I.3 Courbes d'écrouissage cyclique

Les valeurs de contrainte correspondant à la demi-durée de vie sont tracées en fonction de celles de déformation plastique à la figure 4 pour ainsi établir les courbes d'écrouissage cyclique du matériau à 650 et 815°C. A l'échelle bilogarithmique, dans le régime de déformation relativement élevée, la contrainte est reliée à la déformation plastique par une droite:

$$\Delta\sigma = K'(\Delta\varepsilon_p)^{n'} \qquad (1)$$

où K' = coefficient d'écrouissage cyclique
n' = exposant d'écrouissage cyclique

Les résultats indiquent que l'augmentation de la température d'essai fait baisser la valeur de K' tandis que n' est insensible à la température (fig. 4).

I.4 Courbes de Coffin-Manson

La décomposition de la déformation totale en ses composantes élastique et plastique conduit aux diagrammes de la figure 5. La relation entre la déformation élastique et la durée de vie est décrite par l'équation suivante:

$$\Delta\varepsilon_e = C_e N_f^{\alpha} \qquad (2)$$

La déformation plastique est reliée à la durée de vie par:

$$\Delta\varepsilon_p = C_p N_f^{\beta} \qquad (3)$$

La déformation totale est égale à:

$$\Delta\varepsilon_t = \Delta\varepsilon_e + \Delta\varepsilon_p$$

Les valeurs des constantes C_e, C_p, α et β caractéristiques du matériau aux deux températures d'essai sont indiquées sur la figure 5. On remarque que la pente de la relation $\Delta\varepsilon_e - N_f$ est relativement insensible à la température, alors que l'augmentation de la température fait baisser la pente de la relation $\Delta\varepsilon_p - N_f$.

Jusqu'ici, les propriétés caractéristiques de base de l'Inconel 625 en fatigue continue à 650 et 815°C ont été présentées. On verra dans ce qui suit que l'introduction des périodes de maintien dans le cycle affecte considérablement le comportement cyclique du matériau.

II. Cyclage avec temps de maintien

Des essais avec temps de maintien en tension seulement ont été effectués à 650°C. A 815°C, des essais avec temps de maintien en tension seulement et en compression seulement ont été réalisés.

II.1 Effet du maintien sur la durée de vie

L'influence des temps de maintien sur l'endurance de l'Inconel 625 à 650 et 815°C est illustrée aux figures 6 et 7 respectivement. Les résultats limités à 650°C indiquent que l'effet du maintien en tension est très faible à cette température (fig. 6). A faible niveau de déformation ($\Delta\varepsilon_t$ = 0.8%), les périodes de maintien ont même un effet bénéfique (augmentation de l'endurance). Cet effet bénéfique du maintien à une température modérée a été rapporté par d'autres chercheurs pour quelques alliages à base de nickel, tels que l'alliage René 95 [2], l'alliage René 80 [3] et l'alliage AF-115 [4].

Par contre, les périodes de maintien ont un effet important sur le comportement du matériau à 815°C et causent une réduction de la durée de vie. En particulier, cet effet est d'autant plus important que le niveau de déformation est faible. Par exemple, avec une période de maintien de 15 minutes en tension et au niveau de déformation $\Delta\varepsilon_t$ = 1% la durée de vie est réduite de moitié par rapport à celle en fatigue continue; à $\Delta\varepsilon_t$ = 0.6%, elle est réduite d'un facteur de cinq (fig. 7).

Au niveau de déformation élevé ($\Delta\varepsilon_t$ = 1.2%), les résultats d'essais avec 10, 15 et 30 minutes de maintien indiquent que la durée de vie diminue avec une prolongation de la période de maintien. Par contre, à un niveau de déformation plus faible ($\Delta\varepsilon_t$ = 0.6%), les tests avec 5 et 15 minutes de maintien semblent indiquer une saturation de l'effet du maintien (fig. 7). Des essais additionnels sont nécessaires pour confirmer cette observation.

Pour l'Inconel 625, les résultats de la présente étude ont montré que les périodes de maintien en compression sont considérablement plus endommageant que celles en tension et causent par conséquent une réduction plus marquée de la durée de vie du matériau (fig. 7). Par exemple, au niveau de déformation $\Delta\varepsilon_t$ = 0.4%, la durée de vie du matériau est réduite de 60 fois à cause de l'introduction d'une période de 5 minutes de maintien en compression.

II.2 Variation de contrainte

La figure 8 illustre la variation de la contrainte durant le cyclage avec maintien à 650°C aux différents niveaux de déformation imposée en comparaison avec celle obtenue en cyclage continu. Comme on l'a vu à la section I.2, en fatigue continue, l'Inconel 625 se durcit à 650°C. Avec l'introduction des périodes de maintien, ce comportement cyclique est encore plus prononcé, tel que montré à la figure 8.

Le comportement cyclique du matériau à 815°C est indiqué à la figure 9 pour le cas du maintien en tension et à la figure 10 pour celui du maintien en compression. Dans le cas du maintien en tension, la contrainte varie d'une façon assez particulière, l'adoucissement cyclique étant observé pendant les quelques premiers cycles, accompagné par la consolidation et finalement suivi par l'adoucissement. Dans le cas du maintien en compression, le matériau démontre une consolidation cyclique à tous les niveaux de déformation imposée.

Il est intéressant de noter qu'une contrainte moyenne très marquée est développée dans tous les essais avec maintien aux deux températures étudiées (Tableau 2), résultant de la relaxation importante de la contrainte durant la période maintien, le maintien en tension faisant développer des contraintes moyennes en compression et le maintien en compression des contraintes moyennes

en tension. En particulier, la contrainte moyenne augmente avec une diminution de la déformation inélastique, tel qu'illustré aux figures 11 et 12.

La figure 13 illustre la relation entre la contrainte maximale en tension et la déformation totale imposée à 815°C. Les résultats montrent que, à un niveau de déformation imposée donné , on obtient une contrainte maximale en tension la plus élevée avec le cyclage comportant un maintien en compression et une contrainte maximale la plus faible avec le cyclage comportant un maintien en tension. Ce fait est aussi dû à la relaxation importante de la contrainte durant le maintien.

La relation entre la contrainte maximale en tension et la durée de vie est présentée à la figure 14. Il est intéressant de noter que les valeurs de la contrainte maximale en tension développée en fatigue continue et en cyclage avec maintien en compression peuvent être reliées par une seule droite.

On remarque donc que le cyclage avec maintien en compression fait développer une contrainte maximale en tension très élevée en plus d'une forte contrainte moyenne en tension.

On a vu que l'effet du maintien en tension sur l'endurance de l'Inconel 625 est très faible à 650°C. Au niveau de déformation $\Delta\varepsilon_t$ = 0.8%, l'introduction du maintien a même prolongé la durée de vie. Les études qui ont rapporté le même effet bénéfique du maintien en tension pour les autres alliages [2,3,4] ont mis en évidence le développement d'une contrainte moyenne en compression. Basé sur ce fait, Bernstein [2] a soutenu que l'effet bénéfique du maintien en tension pour ces alliages est dû à la contrainte moyenne en compression développée. D'autre part, pour l'Inconel 625 à 815°C, le maintien en compression, auquel est associée une forte contrainte moyenne en tension, cause une réduction considérable de la durée de vie. Ces faits semblent indiquer que la durée de vie est directement reliée à la contrainte moyenne développée durant le cyclage. Cependant, les résultats obtenus à 815°C en cyclage avec maintien en tension ont montré que, malgré le développement d'une forte contrainte moyenne en compression, la durée de vie est considérablement réduite à cause du

maintien, en particulier aux faibles niveaux de déformation imposée. D'autre part, en examinant le comportement cyclique du matériau, nous notons que:

- à 650°C, où l'effet bénéfique du maintien en tension est observé, l'Inconel 625 se durcit cycliquement (fig. 8);
- à 815°C, dans le cas du maintien en tension dont l'effet est défavorable, le matériau s'adoucit durant la majeure partie de sa durée de vie (fig. 9).

Par contre, dans le cas du maintien en compression, dont l'effet est également défavorable, le matériau démontre un durcissement cyclique.

II.3 Relaxation de contrainte

La figure 15 montre les courbes de relaxation de contrainte typiques à 650°C et 815°C. La contrainte relaxée est quasi-constante durant un essai donné; elle est dépendante de la température et du niveau de déformation imposée. On peut noter sur la figure 15 que la relaxation de contrainte se produit rapidement au début de la période de maintien pour se stabiliser par la suite. A 815°C, dans le cas du maintien en tension, indépendamment du niveau de déformation imposée, elle atteint le niveau de saturation après approximativement 5 minutes (fig. 15b). Par contre, à 650°C, la durée de temps à laquelle le niveau de saturation est atteint varie en fonction du niveau de déformation imposée, étant plus rapide à un faible niveau de déformation et plus longue à un niveau élevé de déformation (fig. 15a). A titre d'exemple, au niveau de déformation $\Delta\varepsilon_t$ = 0.8%, la saturation est atteinte en moins d'une minute, à $\Delta\varepsilon_t$ = 1% elle est atteinte après approximativement 2 minutes et à $\Delta\varepsilon_t$ = 1.2% la relaxation de contrainte serait saturée après une période dépassant 30 minutes (aucun essai avec une période de maintien plus longue que 30 minutes n'a été effectué jusqu'à présent).

Plusieurs expressions ont été proposées dans la littérature pour représenter la courbe de relaxation de contrainte durant le maintien. Une des relations les plus fréquemment employées possède la forme suivante [5,6,7]:

$$\ln \frac{\sigma_{init}}{\sigma} = \frac{A}{1+m} t^{(1+m)} \qquad (4)$$

où σ_{init} = contrainte initiale de la période de maintien
σ = contrainte instantanée
t = temps
A, m = constantes

Il a été montré que cette équation représente bien la courbe de relaxation de contrainte pour certains matériaux à haute température, notamment, les aciers inoxydables [5,6,7]. Nous avons donc essayé d'appliquer la relation (4) aux données obtenus sur 1'Inconel 625 dans la présente étude. Des résultats remarquables ont été obtenus. La figure 16 montre la contrainte en relaxation en fonction du temps à 650°C avec 30 minutes de maintien et $\Delta\varepsilon_t$ = 1.2%, ainsi que la courbe donnée par la relation (4). Les résultats à 815°C avec maintien en tension et en compression sont illustrés à la figure 17. On voit donc que la relation (4) représente bien le comportement de relaxation de contrainte de 1'Inconel 625 à 650 et 815°C. Les valeurs des constantes A et m contenues dans 1'équation (4), obtenues à l'aide de la méthode de régression exponentielle, sont résumées au Tableau 3.

CONCLUSION

Les résultats d'essais en fatigue continue et en cyclage avec des temps de maintien à 650 et 815°C ont révélé que le comportement cyclique de 1'Inconel 625 et 1'effet du maintien sur la durée de vie sont fortement dépendants de la température. Les observations suivantes ont été relevées:

- en cyclage continu, 1'Inconel 625 se durcit cycliquement à 650°C, alors qu'il manifeste essentiellement un comportement d'adoucissement cyclique à 815°C;

- les périodes de maintien influencent peu l'endurance du matériau à 650°C et a même un effet bénéfique à faible niveau de déformation imposée; par contre, à 815°C, le maintien cause une réduction de la durée de vie et cet effet est d'autant plus marqué que le niveau de déformation est faible;

- le maintien en compression est considérablement plus endommageant que celui en tension;

- le maintien en tension fait développer des contraintes moyennes en compression et le maintien en compression fait développer des contraintes moyennes en tension; dans les deux cas la contrainte moyenne augmente avec une diminution de la déformation inélastique;

- le comportement du matériau durant le maintien est caractérisé par une relaxation rapide de la contrainte; la durée de temps à laquelle la contrainte relaxée atteint la saturation est dépendante de la température; à 815°C, elle est approximativement de 5 minutes à tous les niveaux de déformation imposée, alors qu'à 650°C, elle augmente avec le niveau de déformation.

Durant les prochains mois, des essais additionnels avec temps de maintien en tension et en compression sont prévus à la température de 650°C pour étudier l'effet du maintien aux faibles niveaux de déformation. L'effet d'une forme de signal particulière (sawtooth waveform) sera aussi envisagé. L'examen métallographique est également planifié afin de comprendre les mécanismes d'endommagement.

REFERENCES

1. Purohit, A., Thiele, U. and O'Donnell, J.E., "Fatigue Strength and Evaluation of Creep Damage during Fatigue Cycling of Inconel Alloy 625", Proc. 1983 Winter Meeting of the American Nuclear Society, San Francisco, Calif., Oct. 30-Nov. 4, 1983.

2. Bernstein, H.L., "An Evaluation of Four Current Models to Predict the Creep-Fatigue Interaction in René 95", Air Force Materials Laboratory Report AFML-TR-79-4075, June 1979.

3. Lord, D.C. and Coffin, L.F., "Low Cycle Fatigue Hold time Behavior of Cast René 80", Metall. Trans., Vol. 14, July 1973.

4. Conway, J.B., and Stentz, R.H., "High Temperautre Low-Cycle Fatigue Data for Three High Strength Nickel-Base Superalloys", Air Force Wright Aeronautical Laboratories Report AFWAL-TR-80-4077, June 1980.

5. Campbell, R.D., "Creep/Fatigue Interaction Correlation for 304 Stainless Steel Subjected to Strain-Controlled Cycling with Hold times at Peak Strain", Jl. Eng. Ind., Nov. 1971.

6. Jaske, C.E., Mindlin, H., Perrin, S., "Combined Low-Cycle Fatigue and Stress Relaxation of Alloy 800 and Type 304 Stainless Steel at Elevated Temperatures", ASTM STP 520, ASTM 1973.

7. Conway, J.B., Stentz, R.H., Berling, J.T., "Fatigue, Tensile and Relaxation Behavior of Stainless Steels", Mar-Test Inc. Publication, 1975.

TABLEAU 1 - Résultats des essais de fatigue continue

taux de déformation = 1%/sec.

Éprouvette #	Variations de déformation (%)			Contrainte (MPa)		Nombre de cycles à rupture N_f
	totale $\Delta\varepsilon_t$	plastique $\Delta\varepsilon_p$	élastique $\Delta\varepsilon_e$	maximale σ_{max}	minimale σ_{min}	
T° = 650°C						
54	0.55	0.013	0.537	459	-472	29,000
55	0.78	0.130	0.650	553	-559	6,780
46	0.99	0.320	0.670	584	-598	940
29	1.19	0.400	0.790	666	-700	800
64	0.6	0.024	0.576	531	-477	16,942
T°C = 815°C						
32	0.37	0.021	0.349	253	-239	57,342
25	0.6	0.063	0.537	387	-402	5,450
24	0.8	0.224	0.576	395	-496	1,374
34	1.0	0.36	0.64	464	-477	560
23	1.0	0.407	0.593	460	-463	421
44	1.2	0.585	0.615	466	-474	455
45	1.2	0.595	0.605	457	-465	315

TABLEAU 2 – Résultats des essais de fatigue avec temps de maintien

Éprouvette #	Temps de maintien (min)*	Variations de déformation (%)			Contrainte (MPa)			Contrainte relaxée (MPa)	Nombre de cycles à rupture
		totale $\Delta\varepsilon_t$	plastique $\Delta\varepsilon_p$	élastique $\Delta\varepsilon_e$	maximale σ_{max}	minimale σ_{min}	moyenne σ_{moy}	σ_{rel}	N_f
				T° = 650°C					
56	2 (t)	0.8	0.159	0.641	433	-791	-179	45	12,000
59	10 (t)	1.0	0.3	0.7	536	-846	-155	154	1,092
40	30 (t)	1.2	0.447	0.753	599	-863	-132	208	712
				T° = 815°C					
58	5 (t)	0.6	0.26	0.34	250	-456	-103	211	722
60	15 (t)	0.62	0.31	0.31	233	-405	-86	210	1,041
51	15 (t)	0.82	0.428	0.392	332	-499	-83.5	297	437
49	15 (t)	1.02	0.605	0.415	371	-501	-65	332	262
36	1 (t)	1.22	0.777	0.443	469	-520	-25.5	332	220
30	10 (t)	1.21	0.633	0.577	431	-566	-67.5	346	310
38	10 (t)	1.22	0.846	0.374	388	-454	-33	308	349
33	15 (t)	1.22	0.777	0.443	441	-543	-51	357	210
37	15 (t)	1.22	0.80	0.42	432	-526	-47	356	223
27	30 (t)	1.22	0.80	0.42	441	-536	-47.5	388	170
75	5 (c)	0.39	0.086	0.304	443	-142	150.5	101	880
71	5 (c)	0.61	0.29	0.32	493	-358	67.5	482	310
68	5 (c)	0.65	0.289	0.361	489	-337	76	271	430
69	15 (c)	1.1	0.706	0.394	506	-427	39.5	384	250

* (t) : tension
(c) : compression

Tableau 3 - Valeurs des coefficients de l'équation de relaxation de contrainte

Échantillon #	A	m
650°C		
56	0.008	-0.8
59	0.016	-0.725
40	0.016	-0.742
815°C		
58	0.122	-0.818
60	0.128	-0.873
51	0.123	-0.865
49	0.125	-0.862
36	0.115	-0.764
30	0.091	-0.867
38	0.088	-0.878
33	0.087	-0.892
37	0.091	-0.892
27	0.082	-0.91
75	0.081	-0.821
71	0.121	-0.818
68	0.107	-0.824
69	0.129	-0.858

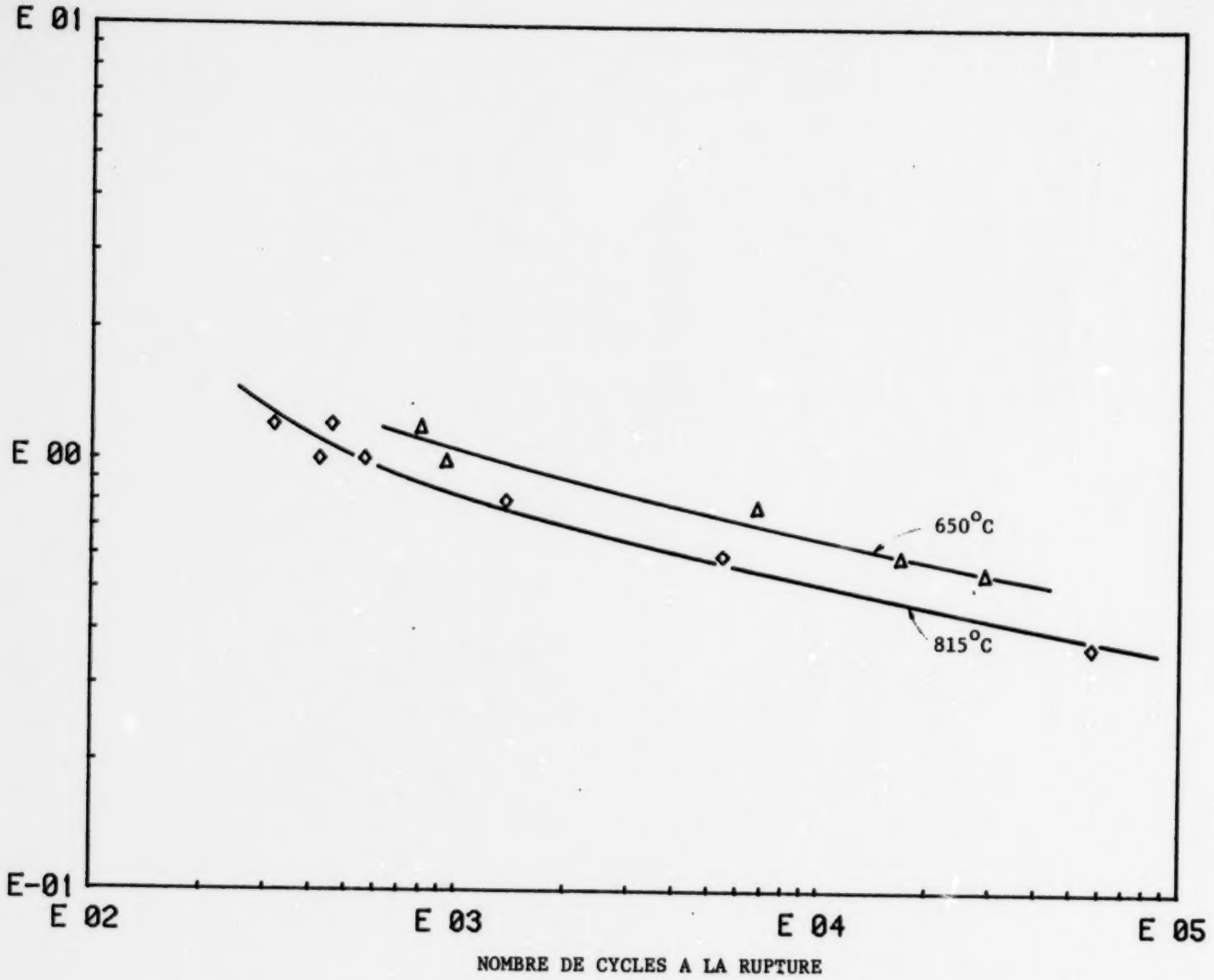


Fig. 1. Courbes de fatigue en cyclage continu de l'Inconel 625 à 650 et 815°C.

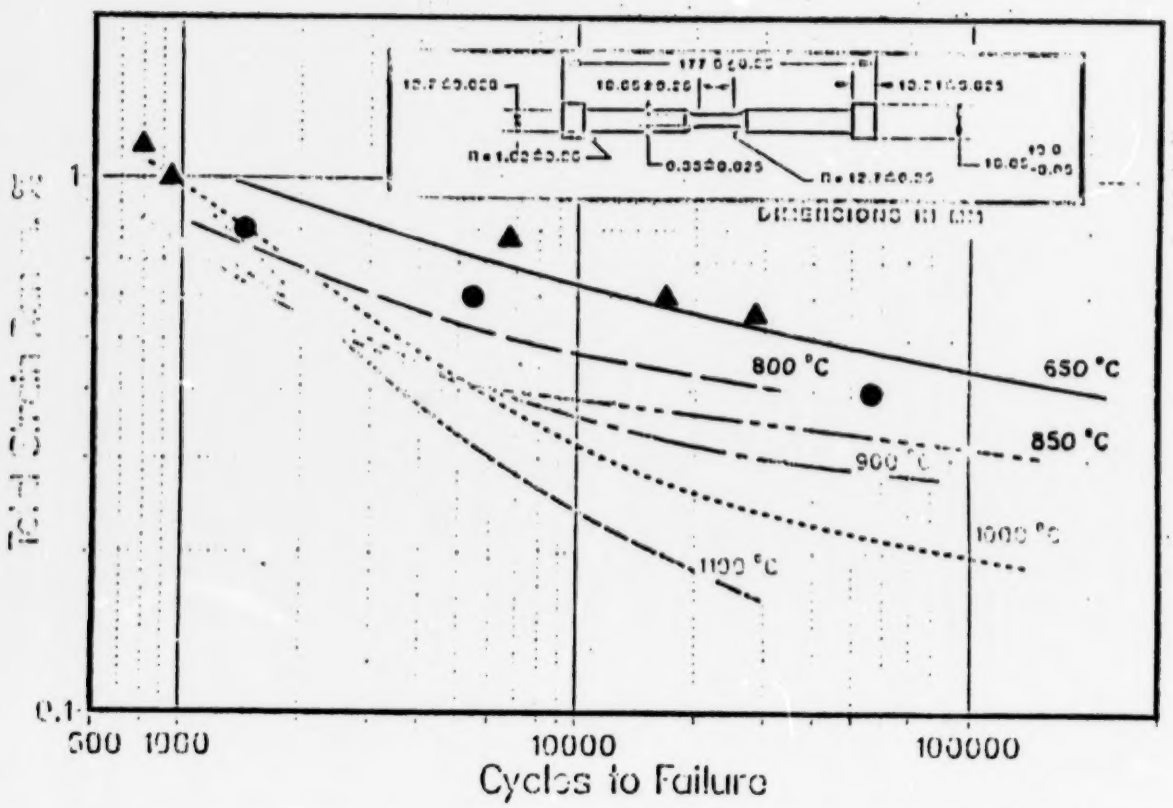


Fig. 2. Comparaison entre les courbes de fatigue publiées par ANL et les données obtenus à l'IGM:

▲ 650°C

● 815°C

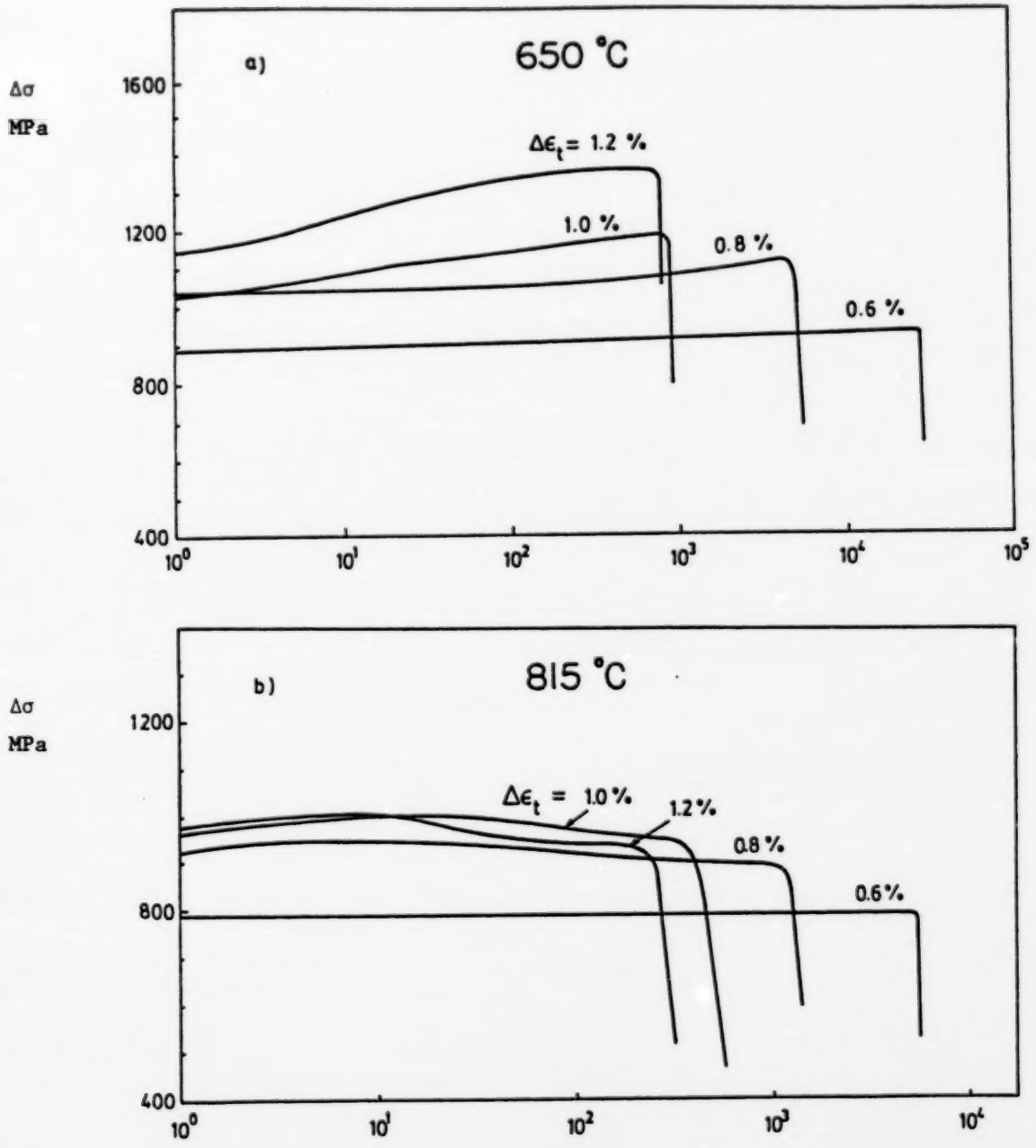


Fig. 3. Variation de contrainte en fonction du nombre de cycles appliqués en cyclage continu.

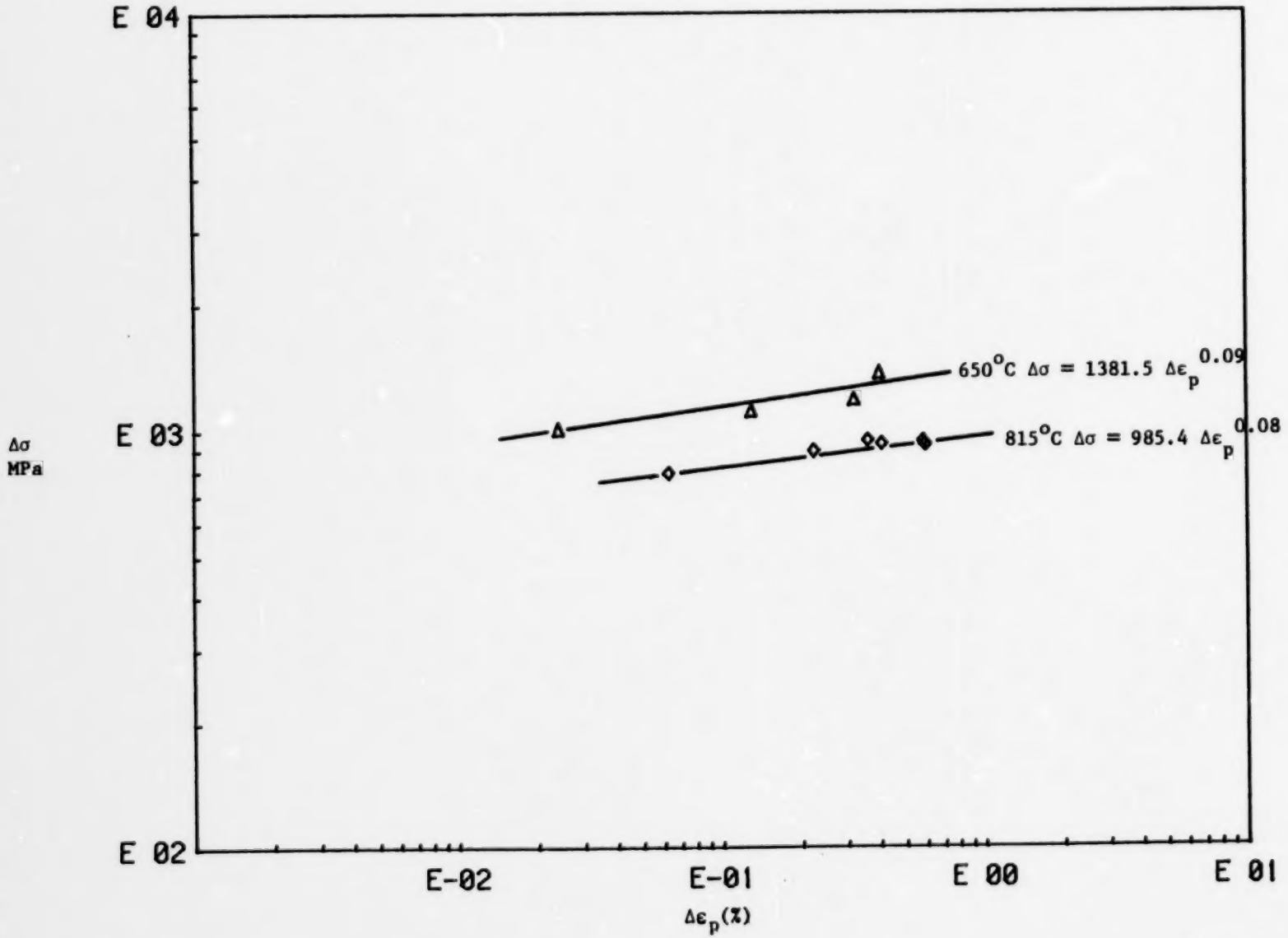
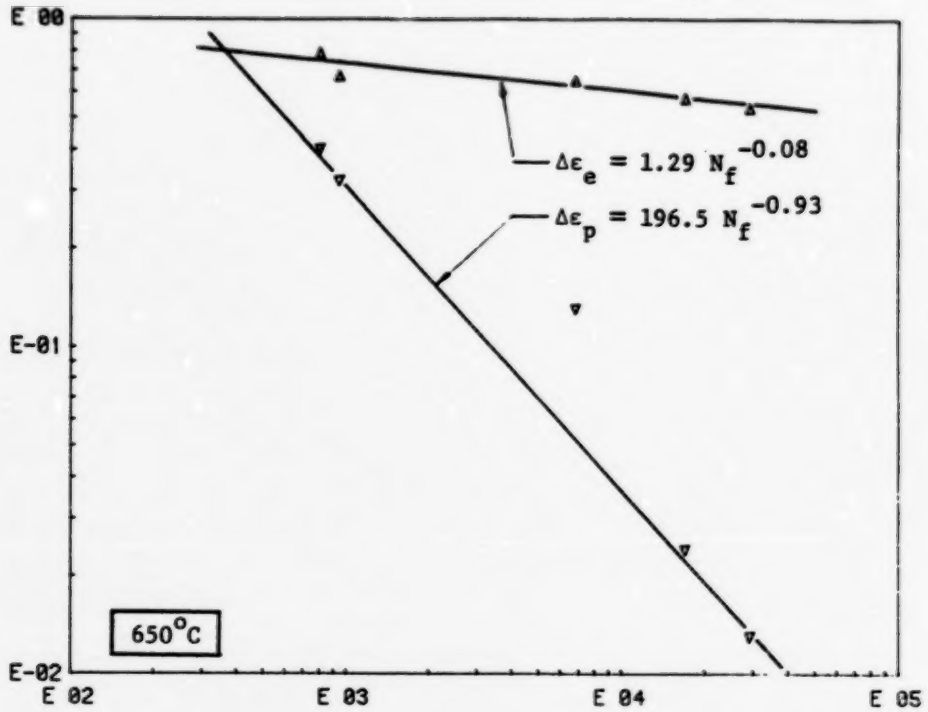
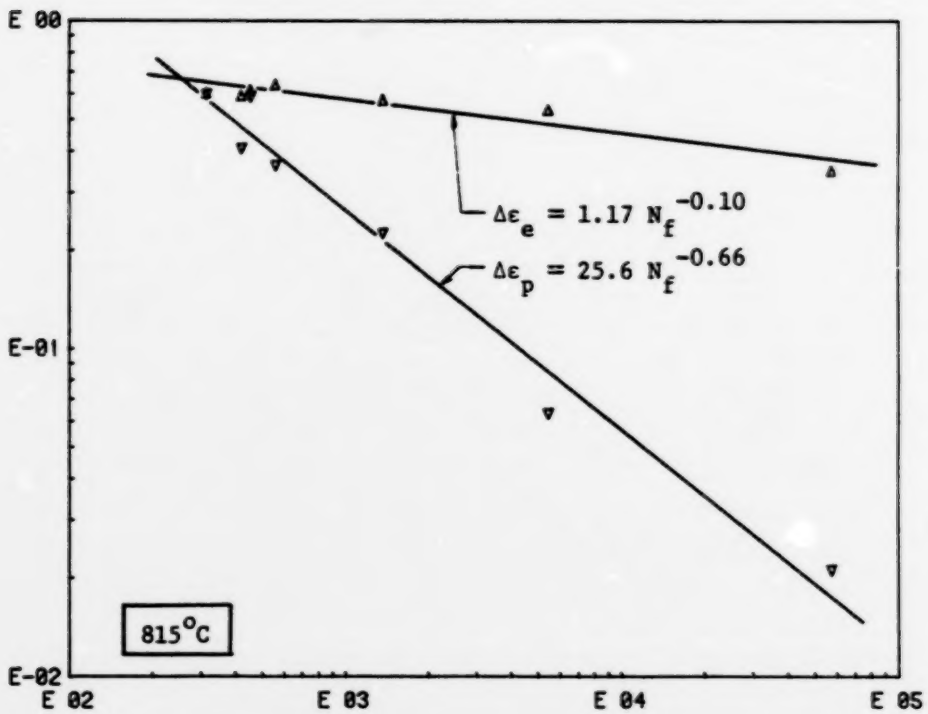


Fig. 4. Courbes d'écrouissage cyclique à 650°C et 815°C.





NOMBRE DE CYCLES A LA RUPTURE

Fig. 5. Relation entre les composantes élastique et plastique de déformation et de la durée de vie.

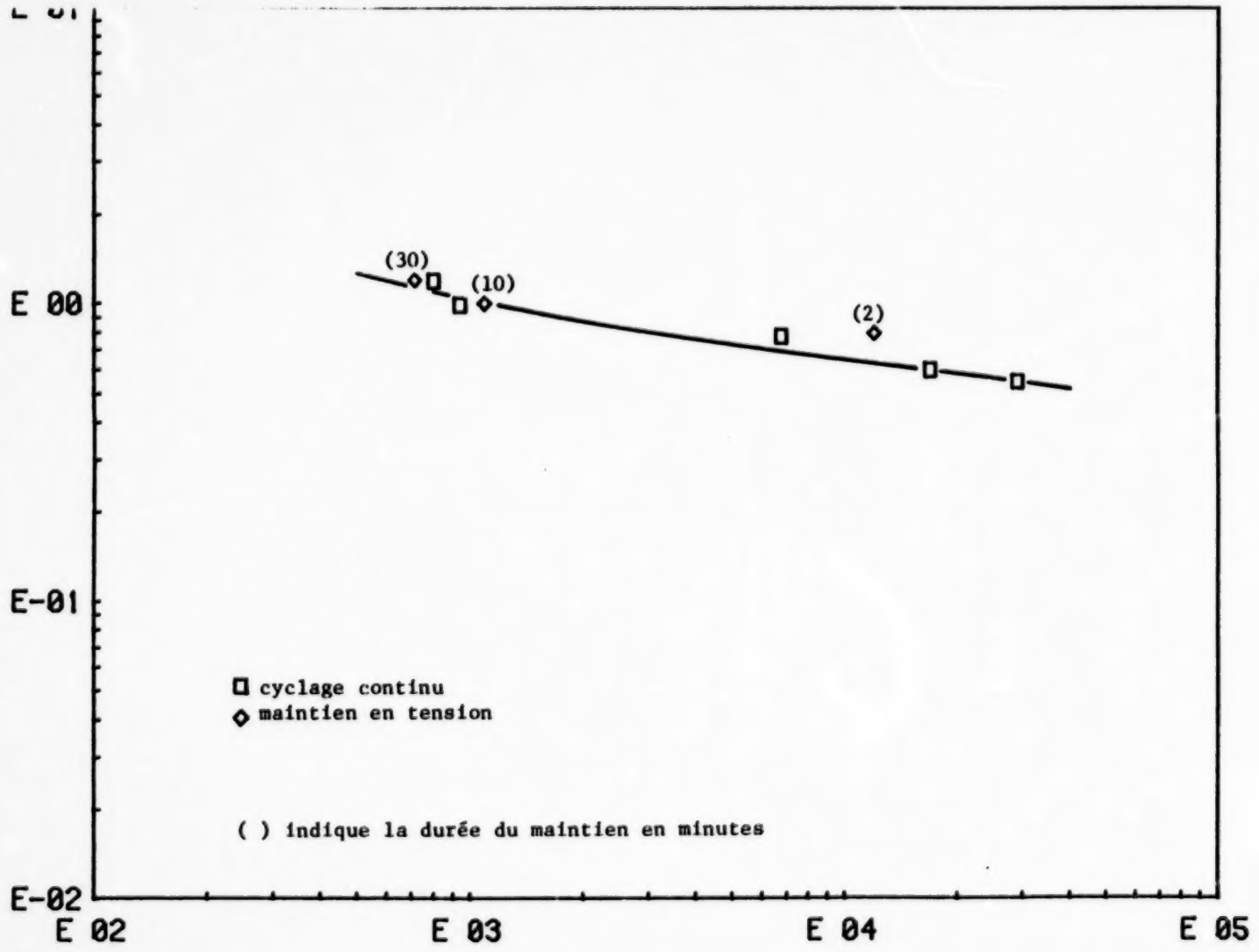


Fig. 6. Effet du maintien sur l'endurance à 650°C.

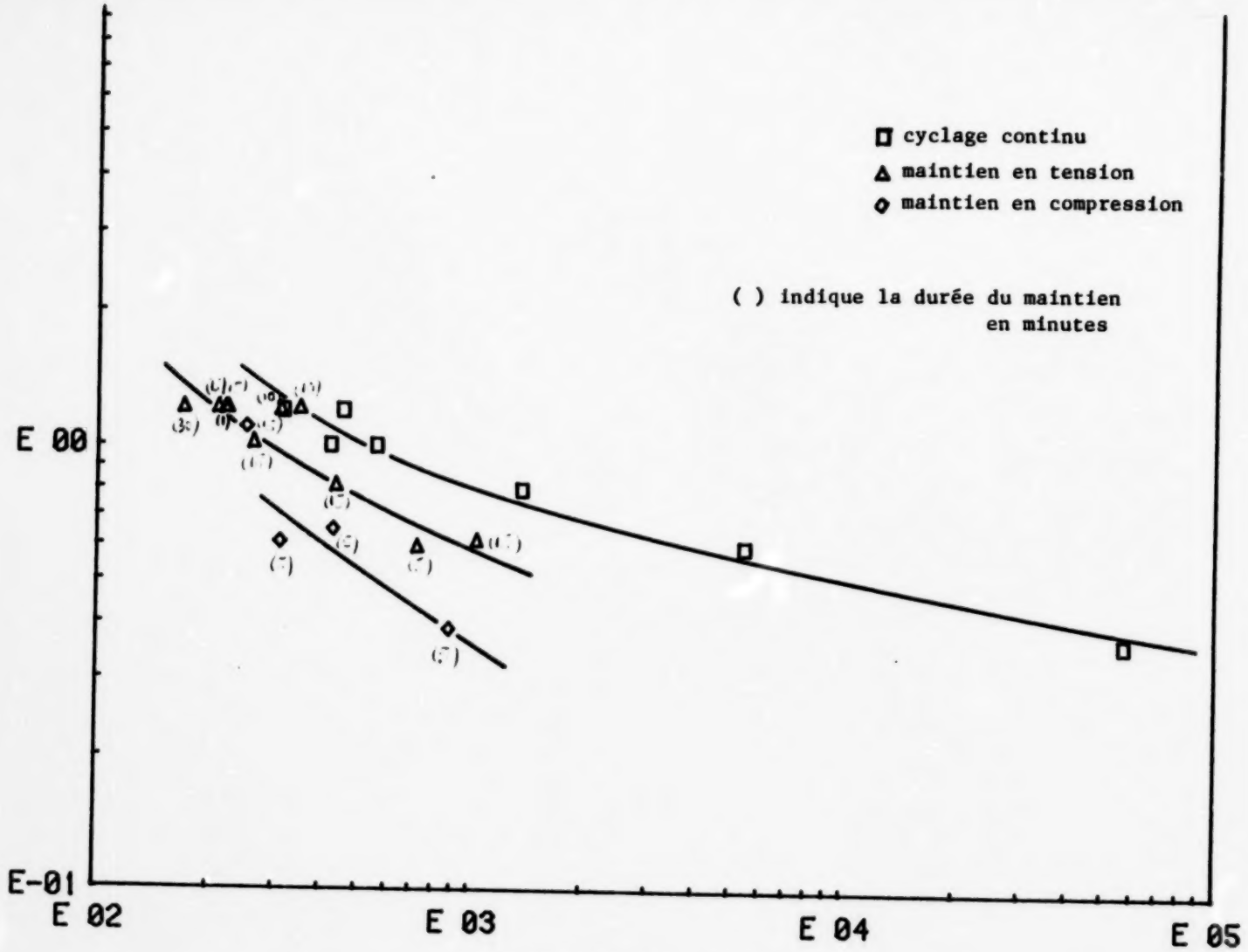


Fig. 7. Effet du maintien sur l'endurance à 815°C.

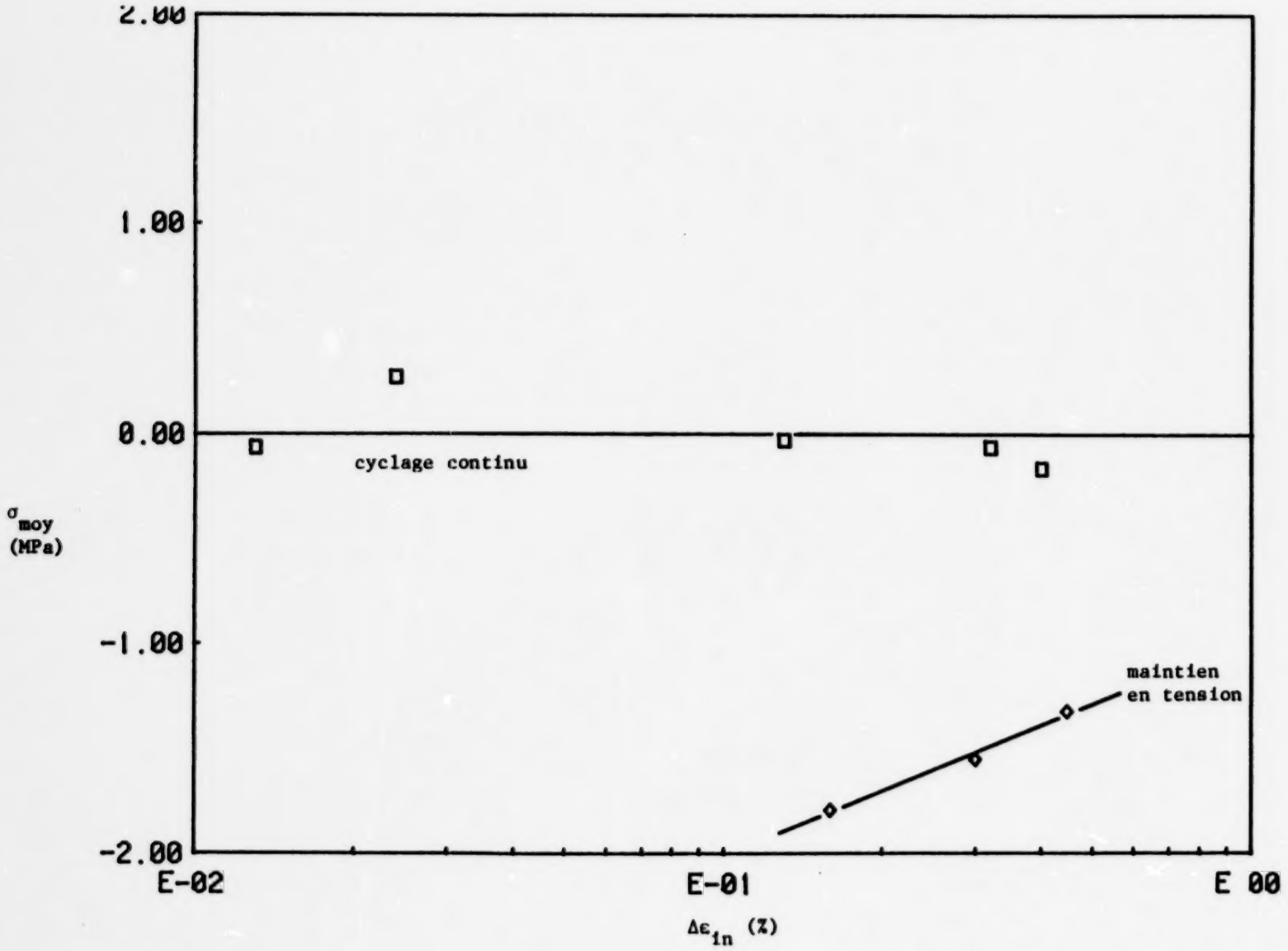


Fig. 11. Relation entre la contrainte moyenne et la déformation inélastique à 650°C.

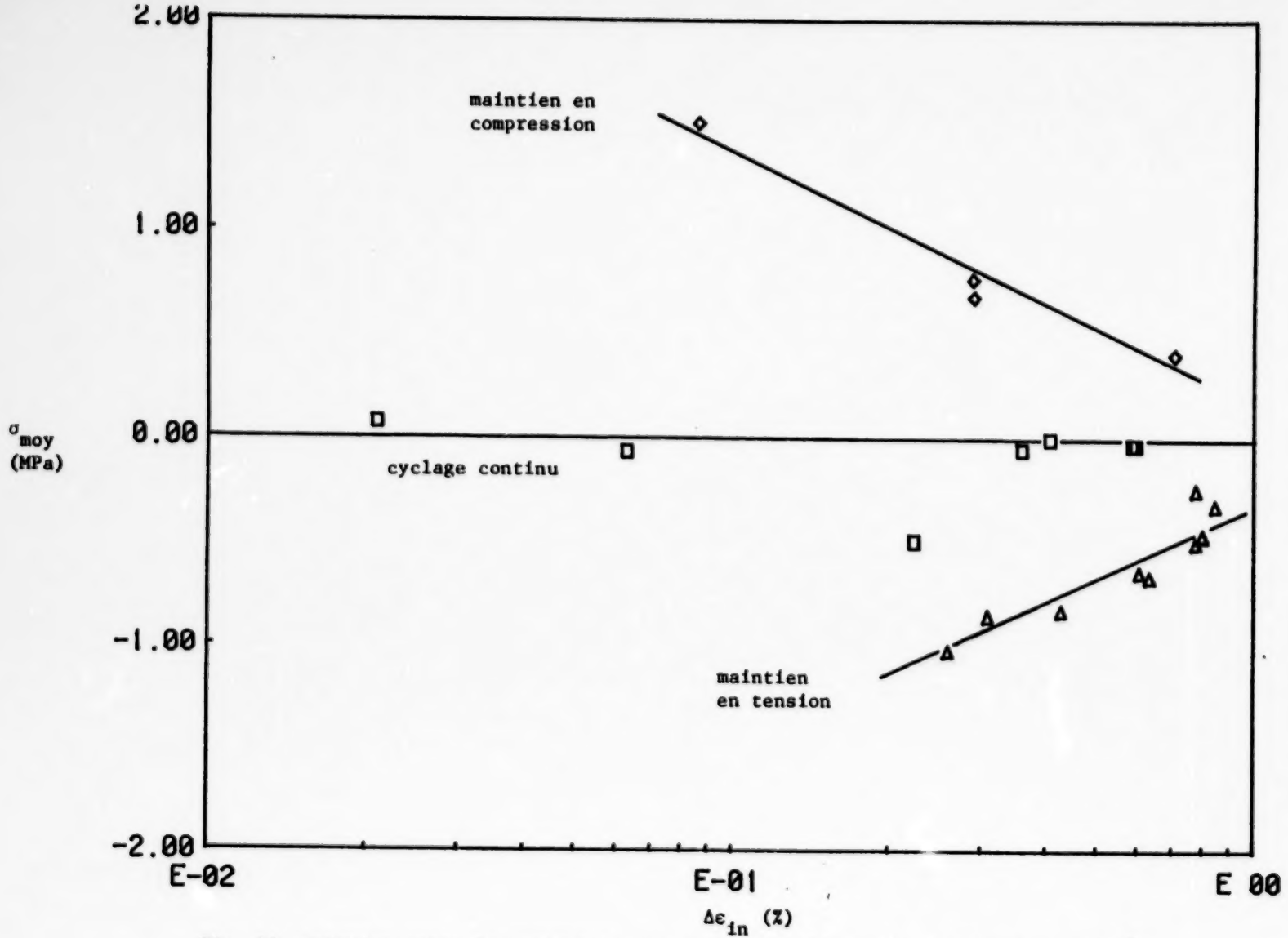


Fig. 12. Relation entre la contrainte moyenne et la déformation inélastique à 815°C.

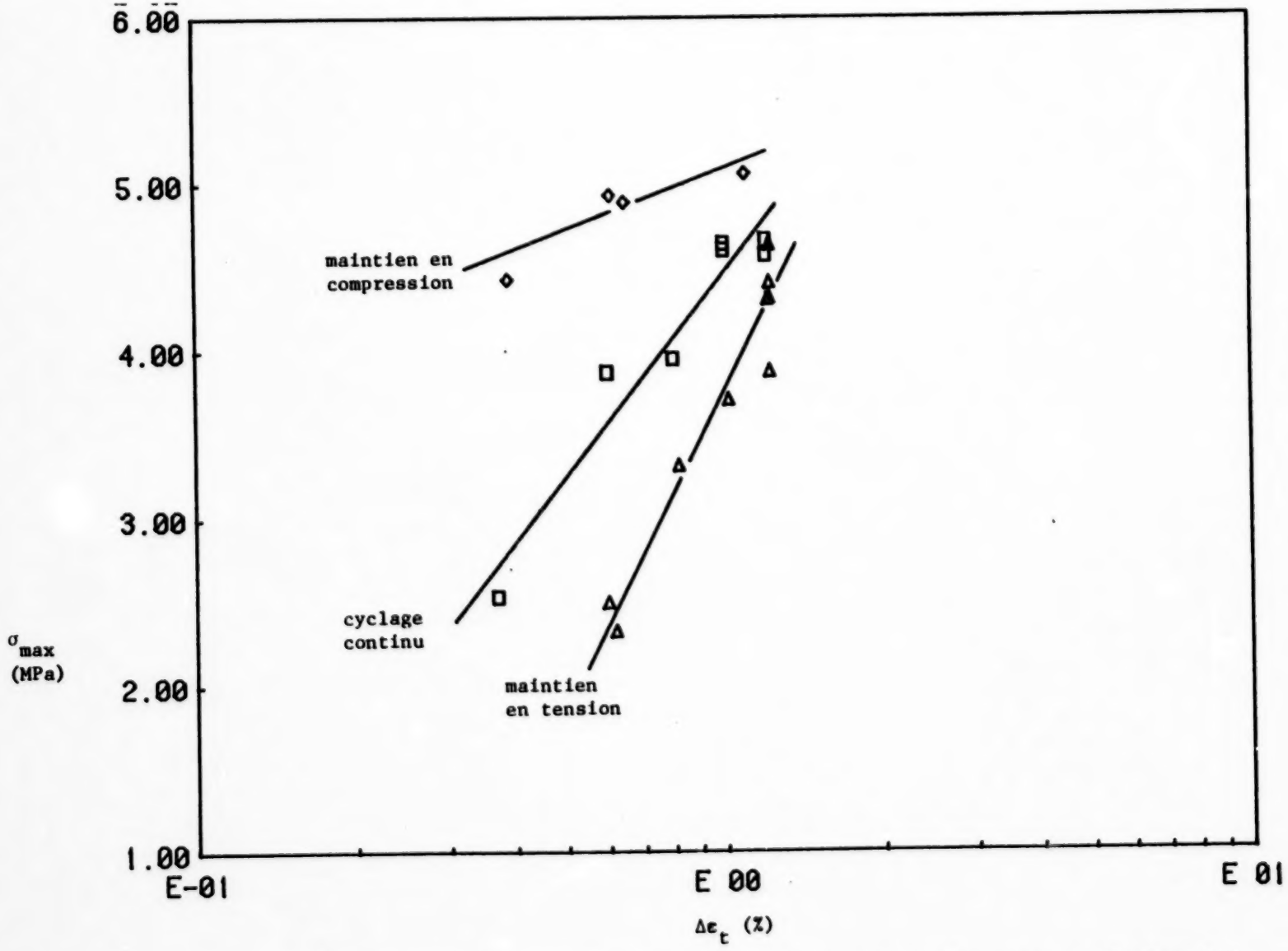


Fig. 13. Relation entre la contrainte maximale en tension et la déformation totale imposée à 815°C.

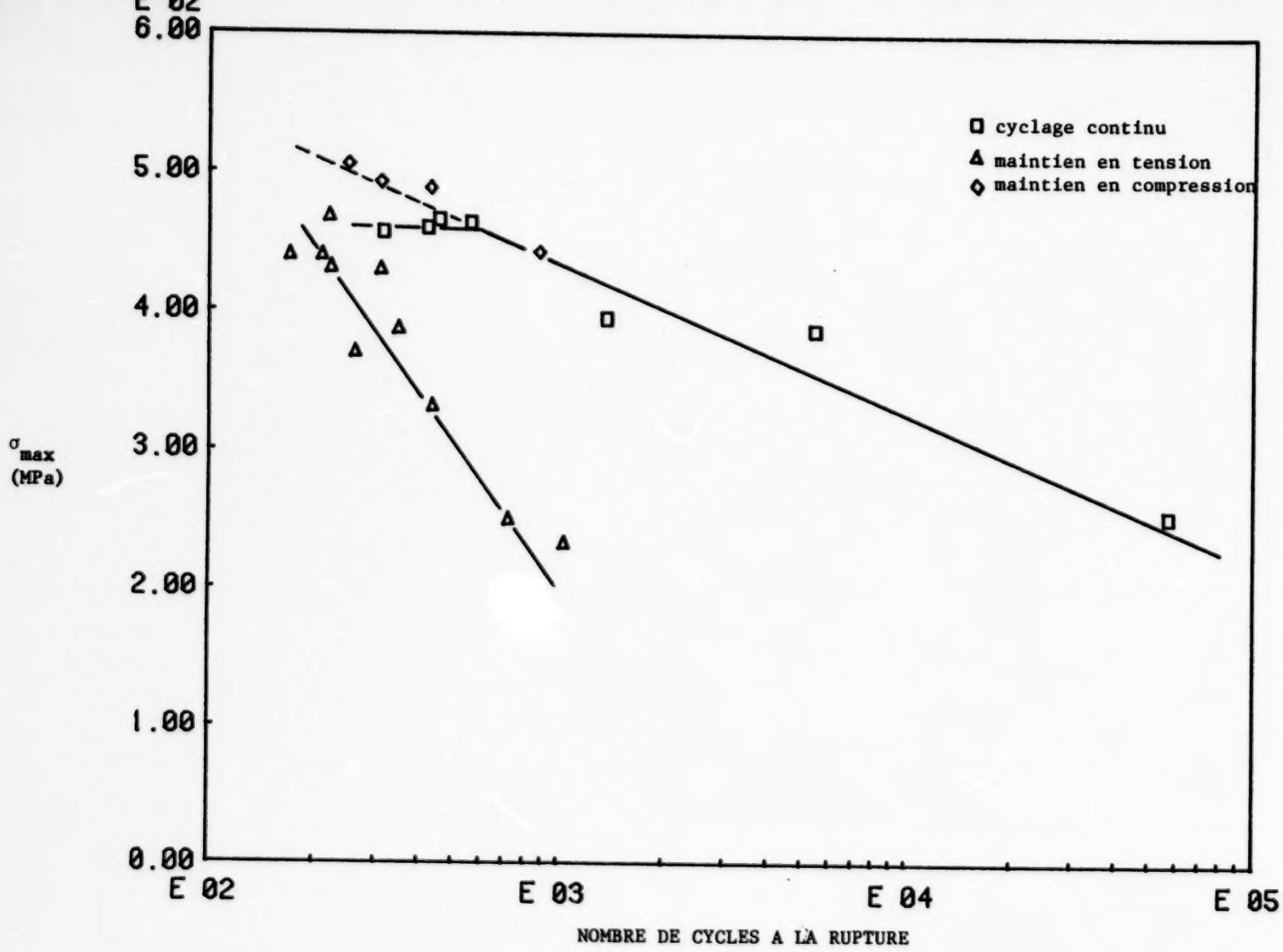


Fig. 14. Relation entre la contrainte maximale en tension et la durée de vie à 815°C.

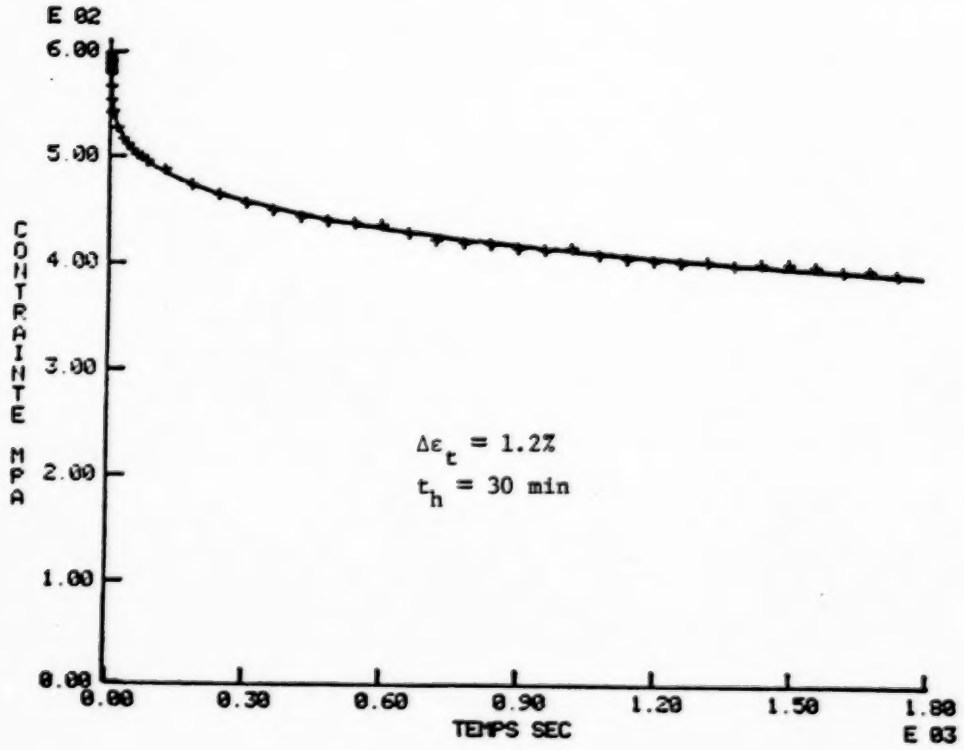


Fig. 16. Corrélation entre la courbe représentée par la relation (4) et les points expérimentaux à 650°C.

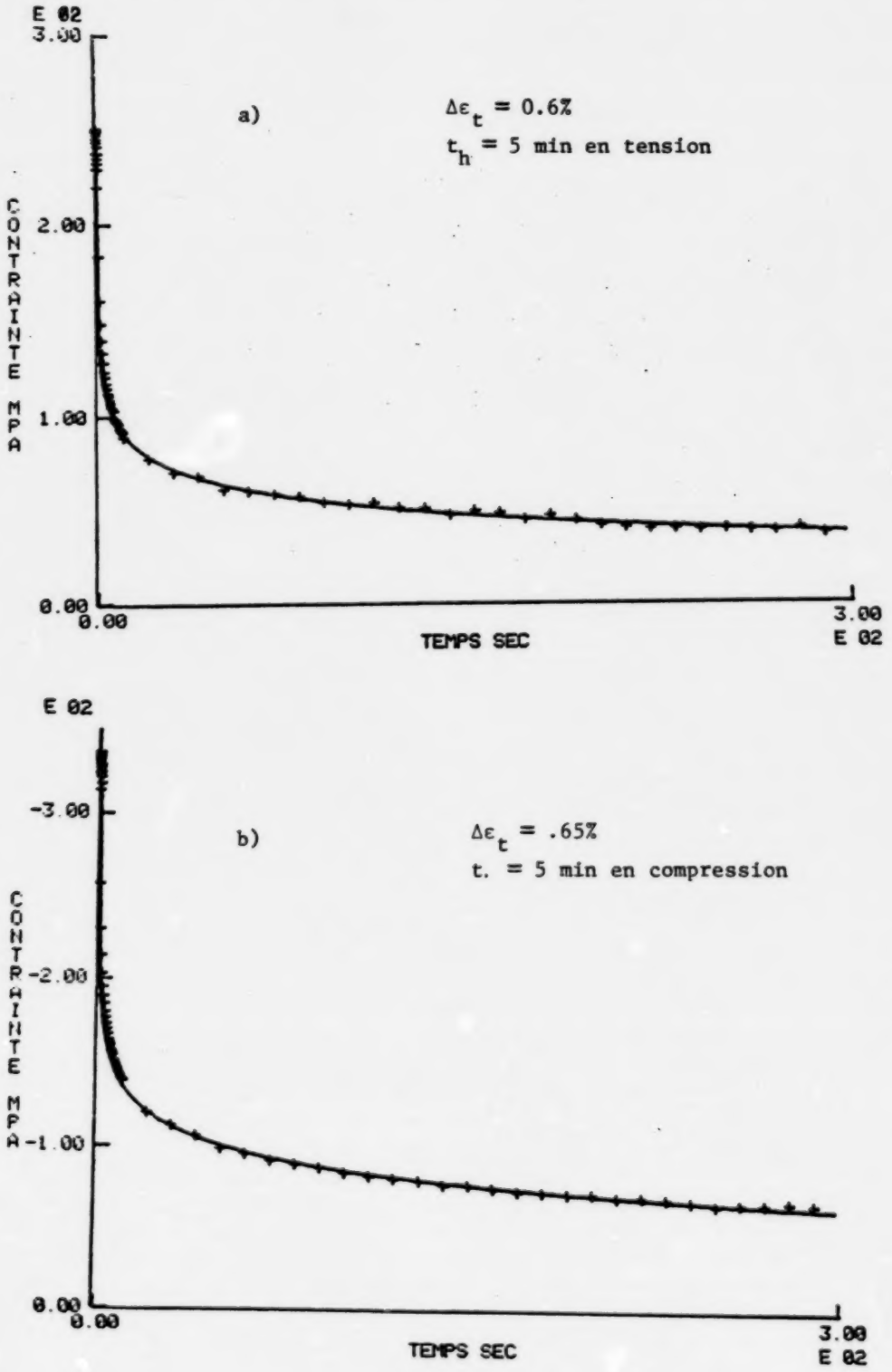


Fig. 17. Corrélation entre la courbe représentée par la relation (4) et les points expérimentaux à 815°C.